第39卷 第2期
2022年3月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 2
Mar. 2022

黄土高原气候和人类活动对植被NPP变化的影响

杨 丹[1]， 王晓峰[2,3]

（1. 长安大学地球科学与资源学院，陕西 西安 710064；2. 长安大学土地工程学院，陕西 西安 710064；
3. 陕西省土地整治重点实验室，陕西 西安 710064）

摘 要：本研究基于CASA模型获得黄土高原2000—2018年植被NPP数据集，通过相关性、残差分析等方法，定量分析了气候变化和人类活动对植被NPP变化的影响。结果表明：（1）黄土高原2000—2018年植被NPP呈东南高、西北低分布格局，研究区约86.86%区域植被NPP呈增加趋势，主要为退耕还林还草的核心区；呈下降趋势的面积占13.14%，主要分布在西北部的干旱区。（2）气候变化和人类活动对植被NPP变化的贡献率分别为48.78%和51.22%，在空间上有明显的差异性，人口稀少、发展相对落后地区的植被变化主要受气候变化的影响；人口众多、经济发展较好地区植被变化以人类活动为主。（3）黄土高原作为干旱半干旱区植被对气候变化的响应较为敏感，随着人类活动的日益频繁，气候和人类活动共同作用于黄土高原的植被变化。本研究有助于理解气候变化和人类活动对植被动态变化的影响，并为黄土高原的植被恢复和高质量发展提供科学依据。

关键词：气候变化；人类活动；残差分析；黄土高原

植被是陆地生态系统的主要部分，是连接大气、土壤、水分的自然纽带，是反映生态环境的重要“指示器”[1-2]。植被净初级生产力（Net Primary Productivity，NPP）是植被在单位时间、单位面积上通过光合作用累积的有机物的数量[3-5]，是陆地生态系统中碳循环的重要部分，可以直接反映全球或区域生态系统的质量状况[3,6]，在生态系统碳源、碳汇的调节过程中发挥重要作用[7-8]。因此，对植被NPP时空变化和影响因素的探究，不仅可以对植被的变化和驱动进行深入的理解，也能为当地生态环境保护和可持续发展提供科学依据。

20世纪60年代，主要通过实测获取植被NPP数据，但这种方法效率低且难以在大尺度上推广[9-10]。之后随着遥感技术的发展，通过遥感模型估算长时间序列植被NPP的方法推广开来[11]，国外学者主要基于气候统计模型[12]、生态机理过程模型[13]和遥感光能利用率模型[14-15]开展对植被NPP的研究。21世纪之后，光能利用率模型(CASA)被广泛应用于各种尺度植被NPP时空变化[16-17]及驱动因素[8,18]的研究。在全球变暖的大背景下，气候变化对植被NPP的影响一直是研究热点[19]；同时，社会政策变化[20]、城市扩张[21]等人类活动的作用也是影响植被变化的重要因素之一，因此，探究气候变化和人类活动对植被动态的影响，在未来各区域应对气候变化和国家生态恢复政策等方面具有积极意义。

黄土高原生态环境脆弱，是黄河流域泥沙的主要来源地，也是我国水土保持重点保护区，其生态系统的变化关系着黄河流域的生态环境以及国家生态屏障的工程效益。为改善黄土高原日益恶化的生态环境，从1999年开始实施了退耕还林还草等一系列生态恢复工程[20]，植被变化及其驱动因素是该阶段研究的重要内容。一方面，侧重于气候因素对植被变化的影响，韩丹丹等[22]研究黄土高原植被变化对极端气候的响应，结果表明NDVI变化与极端气温指数存在相关性，而与极端降水指数未表现出明显的相关性；程晓鑫等[23]研究生态恢复与局地气候变化关系，结果显示黄土高原气候受全球气候变化的影响，植被覆盖度的变化也会影响局地温

收稿日期：2021-10-15； **修订日期：**2021-11-15
基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFC0507300）；陕西省自然科学基础研究计划(2018JM4016)；陕西省土地整治重点实验室开放基金（2018-ZD01）
作者简介：杨丹（1996-），女，硕士研究生，研究方向为生态遥感. E-mail: 271652621@qq.com
通讯作者：王晓峰. E-mail: wangxf@chd.edu.cn

度、风速、湿度的变化。此外,植被变化还与人类活动存在密切关系,城镇化发展[24]、生态恢复工程的实施[25]同样影响着植被变化。但是当前研究多基于NDVI等植被指数,而植被NPP能直接反映植被光合作用积累的有机物数量,对气候和人类活动变化更为敏感,且目前对人类活动的影响研究多基于定性、比较的方法,缺少对人类活动贡献率的定量研究。因此,本文利用CASA模型计算2000—2018年植被NPP,基于相关性分析、残差分析等方法,定量探究气候变化和人类活动在植被NPP变化中的相对贡献率,以期为黄土高原生态保护策略的制定和黄河流域的高质量发展提供科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

黄土高原(107°28′~111°15′E,35°21′~39°34′N)位于我国中部地区,包含内蒙古、宁夏、陕西、山西、甘肃、河南和青海7个省(自治区),面积约为64×10[4] km[2](图1)。地势西高东低,属于干旱半干旱地区,年均温度为4~14 ℃,降水量为200~800 mm。由于干旱少雨的气候、沟壑纵横的地貌、疏松的土质、人类活动的干扰等原因,导致黄土高原成为水土流失最严重的地区和黄河流域的主要来源地。为了改善黄土高原的生态环境,在1999年开始大规模的实施退耕还林还草、治沟造地等生态工程政策,随着生态保护工程的实施,目前黄土高原的生态环境已经有了较大的改善。

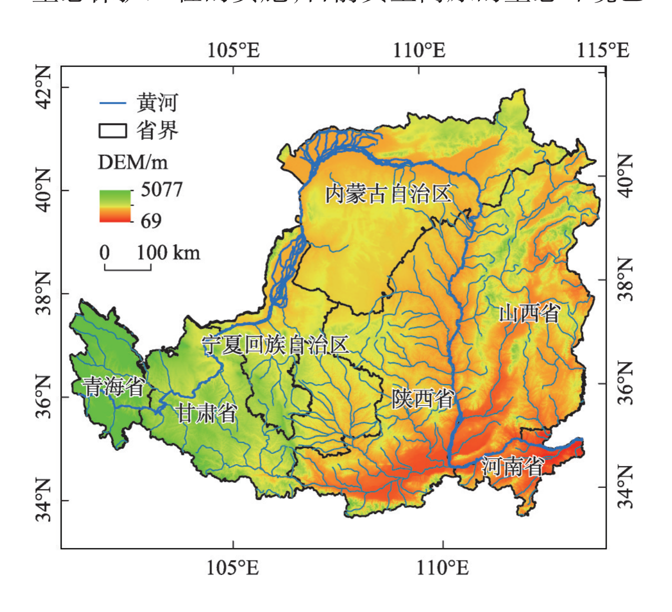


图1 研究区示意图

Fig. 1 Location of the Loess Plateau

1.2 数据来源及处理

采用朱文泉等[26]改进的CASA模型,利用其在IDL平台下开发的模型插件,实现对研究区植被NPP的估算。模型估算所需数据包括:(1)归一化植被指数(NDVI)来自中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)的月尺度植被指数空间分布(1998—2020年)数据集。(2)植被类型数据采用GLC2000项目开发的SPOT 4全球土地覆盖数据中国子集(https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/)。(3)气象数据选取2000—2018年月平均气温和月总降水量站点数据来自中国气象数据网(http://data.cma.cn/);太阳总辐射数据采用国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/)的中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018年),利用Matlab工具进行格式转换、预处理等获得月辐射数据。(4) DEM数据从地理空间数据云获取(http: //www.gscloud. cn)。对上述所有数据进行投影转换、重采样、裁剪等预处理,均统一为1 km×1 km分辨率、WGS_1984_Albers投影。

2 研究方法

2.1 CASA模型

植被NPP作为生态系统服务功能一个重要指标,反映了气候、环境以及人类活动对植被的综合作用,CASA模型由于参数易获取、精度较高、过程简单等优点,已被广泛用于植被NPP的计算[6,26]:

$$\mathrm{NPP}(x,t)=\mathrm{APAR}(x,t)\times\varepsilon(x,t) \tag{1}$$

$$\mathrm{APAR}(x,t)=\mathrm{SOL}(x,t)\times 0.5\times\mathrm{FPAR}(x,t) \tag{2}$$

$$\varepsilon(x,t)=T_{\varepsilon1}(x,t)\times T_{\varepsilon2}(x,t)\times W_{\varepsilon}(x,t)\times\varepsilon_{\max} \tag{3}$$

式中:NPP(x,t)为像元x在t月份的植被净初级生产力;APAR(x,t)为像元x在t月份获得的光和有效辐射;SOL(x,t)为像元x在t月份的太阳总辐射量;FPAR(x,t)为像元x在t月份植被层对入射光合有效辐射的吸收比例;$\varepsilon(x,t)$为植物把吸收的光合有效辐射转化为有机碳的效率;$T_{\varepsilon1}(x,t)$为在低温和高温环境下植物自身生理作用对光合作用产生限制而降低其净初级生产力的程度;$T_{\varepsilon2}(x,t)$为植物在生长最适温度向高温和低温转变时光能利用率逐渐变小的趋势;$W_{\varepsilon}(x,t)$为水分状态对光能利用效率的限制程度;$\varepsilon_{\max}$为理想状态下最大光能利用率。

2.2 年际变化趋势分析

采用一元线性回归方程计算植被NPP的年际变化趋势[27]，并将其斜率定义为植被NPP的年际变化趋势率（*slope*），公式如下：

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n}(i \times \mathrm{NPP}_i) - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} \mathrm{NPP}_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \sum_{i=1}^{n} i} \tag{4}$$

式中：*slope*为NPP与时间变量拟合的一元线性回归方程的斜率；i为时间变量，等于1到n的整数；n为研究时段的年数，等于19；NPP_i为第i年的生长季平均NPP。*slope*<0和*slope*>0分别表示NPP序列随时间递减和递增；*slope*绝对值越大，表明NPP变化越快。变化趋势的显著性采用F检验，公式如下：

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \tag{5}$$

$$U = \sum_{i=1}^{n}(\hat{y} - \bar{y})^2 \tag{6}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 \tag{7}$$

式中：U为误差平方和；Q为回归平方和；y_i表示第i年NPP的实际值；$\hat{y}$表示第i年的回归值；$\bar{y}$表示多年NPP的平均值；n表示时间序列。

2.3 相关分析

相关分析是揭示两个及以上处于同等地位的随机变量间关系的分析方法，本研究基于像元分析分别计算NPP与不同气候因子之间的关系，相关系数的计算如下[22]：

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{8}$$

式中：R_{xy}为相关系数；n为样本数；x_i、y_i分别是x、y的第i个值；$\bar{x}$、$\bar{y}$分别是变量x、y的平均值。相关系数介于−1～1之间，其绝对值越接近1，两变量的相关程度越强，越接近0，相关程度越弱。

2.4 残差分析

在数理统计中，残差分析是指实际真值与预测值之间的差值；在生态学中，残差分析是通过建立回归模型，具体量化气候变化和人类活动对植被变化的影响[28]。主要分两个步骤：（1）以降水、气温时间序列数据为自变量，基于回归模型拟合得到的NPP预测值，即NPP_{CC}（代表气候变化对植被NPP的影响）；（2）实际真值NPP_{obs}和NPP_{CC}的差值为NPP残差，即NPP_{HA}（代表人类活动对植被NPP的影响）公式如下：

$$\mathrm{NPP}_{CC} = a \times T + b \times P + c \tag{9}$$

$$\mathrm{NPP}_{HA} = \mathrm{NPP}_{obs} - \mathrm{NPP}_{CC} \tag{10}$$

式中：NPP_{CC}和NPP_{obs}分别表示基于回归模型的NPP预测值和基于遥感影像的NPP观测值；NPP_{HA}为残差；T和P分别表示平均气温和降水量；a、b、c为模型参量。当$\mathrm{NPP}_{HA} > 0$表示人类活动对NPP有积极影响；当$\mathrm{NPP}_{HA}=0$表示人类活动对NPP基本没有影响；当$\mathrm{NPP}_{HA} < 0$表示人类活动对NPP变化有消极影响。由于本文不对其他因子的贡献率做分析，即认为气候变化贡献率+人类活动贡献率=1。

3 结果与分析

3.1 黄土高原植被净初级生产力时空变化

2000—2018年黄土高原植被NPP呈现南高北低、东高西低的分布格局（图2a），其中，高值区主要分布在南部的关中地区和东部的山西省，2012年达到最高值；低值区主要分布在西北部的内蒙古自治区、陕西省北部、宁夏回族自治区和甘肃省部分地区。由图2b可知，植被NPP均值年际变化较大，2000年和2001年均小于350 g·m^{-2}·a^{-1}，其余年份的值均处于400~500 g·m^{-2}·a^{-1}，呈波动上升的趋势，增长速率为6.32g·m^{-2}·a^{-1}。将黄土高原植被NPP均值所占面积百分比划分为4个等级：0~250 g·m^{-2}·a^{-1}、250~500 g·m^{-2}·a^{-1}、500~750 g·m^{-2}·a^{-1}、>750 g·m^{-2}·a^{-1}。结果表明，植被NPP均值在0~250 g·m^{-2}·a^{-1}的面积占比在2000年和2001年分别为40.74%、42.73%，其余年份均小于35%，且在整个研究时限内该区间面积占比有减少的趋势；植被NPP均值在250~750 g·m^{-2}·a^{-1}区间的面积占比最大约为53%~77%；植被NPP均值在>750 g·m^{-2}·a^{-1}的面积占比2000年和2001年小于5%，其余年份面积占比在6%~14%波动变化，且呈缓慢上升的态势。整体上，2000—2018年黄土高原植被NPP呈现西北低东南高的分布格局和波动增长的变化趋势。

2000—2018年黄土高原植被NPP拟合斜率在−39.44~36.55 g·m^{-2}·a^{-1}（图3），呈增加趋势的面积占比为86.86%，分布于研究区的大部分地区，其中，极显著增加和较显著增加的区域主要分布在陕西北

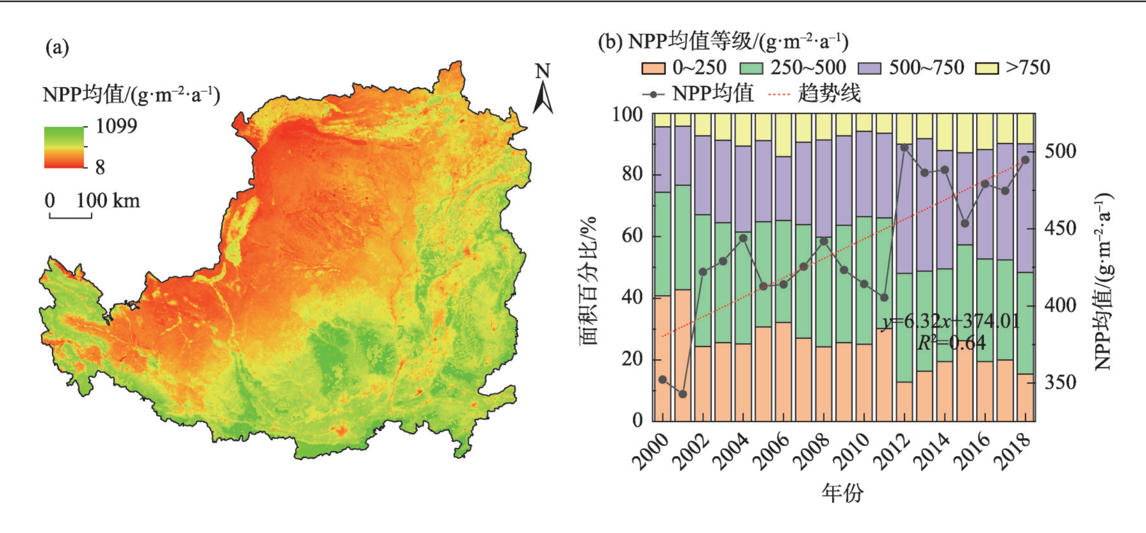


图2 黄土高原2000—2018年植被NPP均值(a)及各区间面积百分比(b)

Fig. 2 Changes in annual NPP (a) and percentage of area in each interval (b) in the Loess Plateau from 2000 to 2018

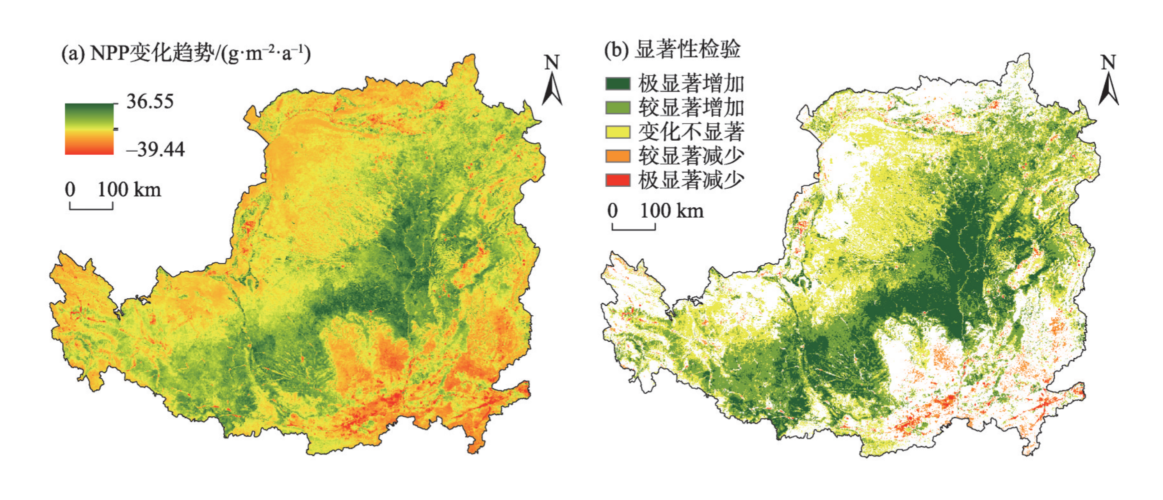


图3 黄土高原2000—2018年植被NPP变化趋势(a)及显著性检验(b)

Fig. 3 Trends of NPP (a) and significance test (b) in Loess Plateau from 2000 to 2018

部(延安市、榆林市)、山西吕梁山区一带(朔州市、忻州市、吕梁市、太原市)、宁夏的固原市和甘肃东南部(临夏市、定西市、天水市、庆阳市);变化不显著的区域主要分布在内蒙古(鄂尔多斯市、呼和浩特市、乌兰察布盟)、山西省晋中市、宁夏、甘肃(白银市、兰州市)和青海省;呈减少趋势的面积占比为13.14%,主要零星分布于黄土高原东南部的河南省、陕西省关中地区和西北部的边远地区。

3.2 气候变化对植被净初级生产力的影响

IPCC评估报告指出,全球气候正在变暖,而且气候变暖与碳循环存在显著的正相关关系,但是不同地区气候因子对植被NPP积累的作用不尽相同。由图4a可知,黄土高原的累计降水量与年均植被NPP的相关系数为0.47,其中正相关关系占整个研究区的93.79%,主要分布在黄土高原北部的内蒙古自治区、陕北、山西、甘肃、青海和宁夏回族自治区的大部分地区;负相关关系占整个研究区的6.21%,主要分布在黄土高原南部的关中平原、河南省。由图4b可知,黄土高原的年平均气温与年均植被NPP的相关系数为-0.05,其中正相关关系占整个研究区的41.5%,主要分布在陕西榆林、山西西部(吕梁市、太原市、晋中市和忻州市)、宁夏和青海省;负相关关系占整个研究区的58.5%,主要分布在内蒙古自治区鄂尔多斯市、陕西省(延安市、渭南市)和甘肃省定西市。总体上,黄土高原植被NPP与降水、气温的相关性具有一定的空间异质性,且二者的相关有一定的互补性,即与降水呈现正相关的地区和气温呈负相关关系,与降水呈现负相关的

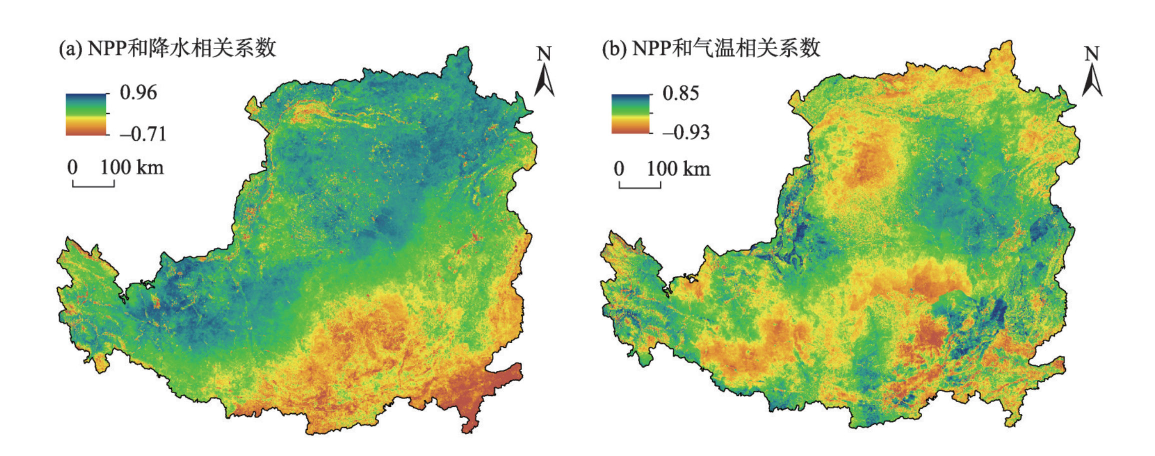


图4 黄土高原2000—2018年植被NPP与降水(a)、气温(b)的相关性

Fig. 4 Correlation of vegetation NPP with precipitation (a) and air temperature (b) in the Loess Plateau from 2000 to 2018

地区和气温呈正相关关系。

3.3 人类活动对植被净初级生产力的影响

植被NPP的变化是气候变化和人类活动共同作用的结果，本研究基于降水、气温两个气候因子，首先计算植被NPP预测值，然后用植被NPP真值与预测值的差值NPP_{HA}代表人类活动对植被NPP的影响。由图5a可知，黄土高原2000—2018年人类活动对植被NPP的影响速率每年为3.72%，呈现由负转正的波动上升趋势，表明人类活动对植被的影响由消极变为积极，其中2000年和2001年的人类活动对植被NPP主要表现为较大消极影响，主要是因为退耕还林还草工程实施初期，退耕地上没有生长出新的植被，即人类活动对植被表现为消极影响；在2002年之后人类活动对植被NPP主要表现为积极作用，是因为随着植被的逐渐恢复、环境好转、生态得到改善。如图5b可知，人类活动对植被NPP影响呈降低的趋势面积占研究区的15.75%，分布于内蒙古北部、陕西关中地区和河南省的部分地区；人类活动对植被NPP影响表现为增加趋势的面积占比为84.25%，分布于研究区的大部分地区，其中陕西北部的延安市、榆林市地区人类活动的影响最为明显。总而言之，人类活动在黄土高原植被恢复、生态环境改善的过程中具有重要影响。

3.4 气候变化和人类活动对植被净初级生产力的相对贡献率

黄土高原的植被NPP变化受到气候变化和人类活动的共同驱动。本研究基于植被NPP真值、预测值和残差趋势进行相对贡献率的计算，得到2000—2018年气候变化和人类活动对黄土高原植被NPP的相对贡献率分别为48.78%、51.22%。

如图6a所示，将气候变化对黄土高原植被NPP的贡献率分为5个等级：0%~20%、20%~40%、40%~

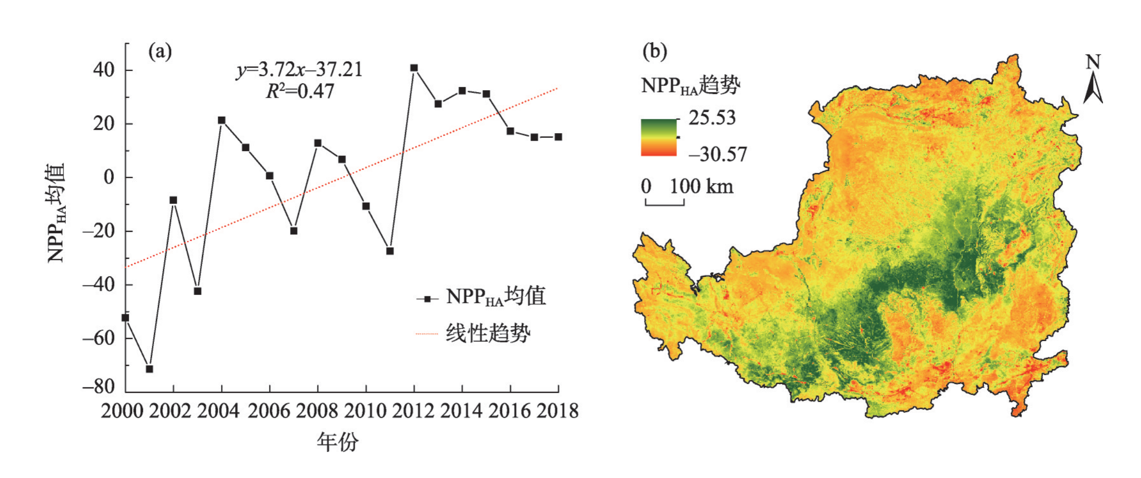


图5 黄土高原2000—2018年人类活动对植被NPP的影响

Fig. 5 Impact of human activities on NPP in Loess Plateau from 2000 to 2018

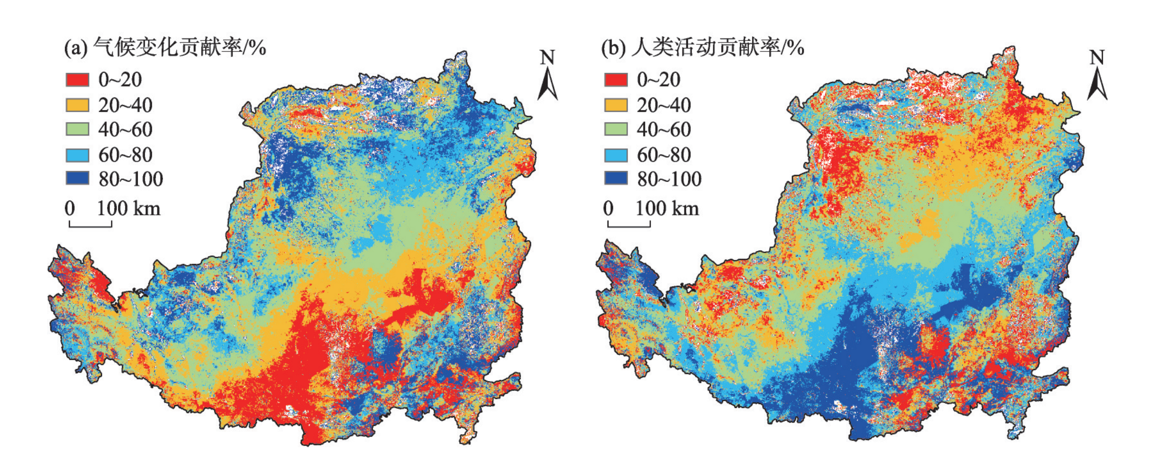


图6　2000—2018年气候变化(a)和人类活动(b)对植被NPP贡献率的空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of climate change (a) and human activities (b) contributions to NPP from 2000 to 2018

60%、60%~80%和80%~100%，面积占比由少到多为40%~60%>20%~40%>60%~80%>0%~20%>80%~100%，气候变化贡献率在60%~100%的占比为32.76%，主要分布在河套平原一带、山西北部（朔州市、大同市）和南部（长治市、临汾市、晋城市、运城市）地区；其次气候变化贡献率在20%~60%的面积占比最大，主要分布在山西中部（忻州市、太原市、晋中市、阳泉市、吕梁市）、陕西北部（榆林市、延安市）、甘肃东部（定西市、临夏市）、宁夏回族自治区（固原市）和青海省（海东市）；气候变化贡献率为0%~20%范围的面积占比为17.22%，主要分布在南部庆阳市、平凉市、宝鸡市、吕梁市、临汾市的部分地区。

如图6b所示，将黄土高原人类活动对植被NPP的贡献率分为5个等级：0%~20%、20%~40%、40%~60%、60%~80%和80%~100%，面积占比由少到多以此为40%~60%>60%~80%>20%~40%>80%~100%>0%~20%，其中人类活动贡献率在60%~100%的面积占比为38.85%，主要分布在山西中部（吕梁市、临汾市）、陕西（延安市、宝鸡市）、庆阳市、平凉市；人类活动贡献率在20%~60%的面积占比为45.89%，主要分布在山西北部和毗邻的内蒙古自治区呼和浩特市和乌兰察布市、甘肃省的东南部、陕西北部；人类活动贡献率在0%~20%的面积占比为15.26%，主要零星分布在黄土高原的边缘地区。

在省域尺度上，气候变化对植被NPP的平均贡献率为47.98%，贡献率由小到大为甘肃省＜陕西省＜河南省＜青海省＜山西省＜宁夏回族自治区＜内蒙古自治区（图7），其中只有甘肃省和陕西省的贡献率小于40%，内蒙古自治区的气候变化贡献率最高为64.4%，其次为宁夏回族自治区的贡献率53.83%。人类活动对植被NPP的平均贡献率为52.02%，贡献率由小到大为内蒙古自治区＜宁夏回族自治区＜山西省＜青海省＜河南省＜陕西省＜甘肃省，其中，内蒙古自治区的人类活动的贡献率最低为35.6%，甘肃省的人类活动贡献率最高为60.79%，其次为陕西省的人类活动贡献率60.35%。气候变化在人口稀少、发展相对落后省份的植被NPP变化中有重要影响；人类活动在人口众多、经济发展较好省份植被NPP变化中占举足轻重的地位。

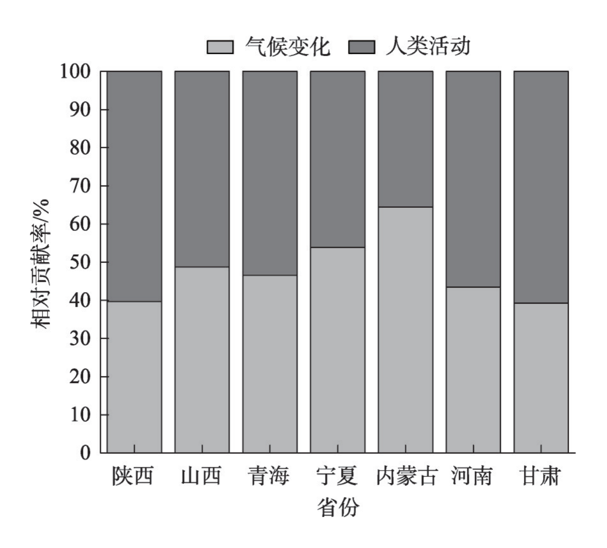


图7　黄土高原2000—2018年不同省份气候变化和人类活动的相对贡献率

Fig. 7　Relative contribution of climate change and human activities in different provinces

4 讨 论

4.1 黄土高原植被净初级生产力时空分布格局成因

在时间上，2000—2018年黄土高原植被NPP的年际变化较大(图1)，但整体上呈现波动上升的趋势。因为在1999年后实施了退耕还林还草的生态恢复工程，而黄土高原作为其重点示范区，随着生态工程的实施，植被逐步恢复，生态环境得到较好的改善，植被NPP呈现上升的趋势，这与Teng等[29]人的研究结果一致。在空间上，2000—2018年黄土高原年均植被NPP呈现西北低东南高的分布格局(图2)，黄土高原86.86%的植被NPP呈增加趋势，主要位于研究区中部的陕西北部和山西吕梁山区，即退耕还林还草的核心区域；13.14%的地区植被NPP呈下降趋势，主要分布于西北部的干旱沙漠区等自然环境较差的地区，这与Feng等[30]和Li等[31]的研究结果一致。

4.2 黄土高原气候变化及人类活动对植被净初级生产力的作用机制

气候变化会使植被的种类、分布、生长状况发生改变以适应新的环境[32]，尤其在干旱、半干旱区，植被对气候因子变化的响应更为敏感。如图3a所示，研究区植被NPP与降水呈正相关关系的面积占93.79%，这是因为黄土高原是典型的干旱半干旱区，水资源是限制植被生长的主要气候因素，降水的增加有利于植被生长[2]；呈负相关关系占6.21%，主要位于东南部的汾河流域、黄河下游三角洲地区，这些地区降雨充沛，植被变化主要受人类活动的作用[33]。如图3b所示，黄土高原植被NPP与平均气温的相关系数为-0.05，因为温度的上升使蒸散量增加[34]、土壤水分不足以支持植被的生长，甚至导致土壤干层加厚[35-36]。植被变化除受气候变化的影响外，还与人类活动密不可分[37]。由图4所示，人类活动影响呈减少趋势的面积占比为15%，主要位于陕西关中平原、内蒙古自治区北部等经济发展较好的、人口众多地区，这些地区为了满足城市发展的需要，大规模的耕地等被转换为建设用地，导致生态环境遭到破坏，人类活动对植被NPP表现为消极作用[38]；人类活动影响呈增加趋势的面积占84.25%，主要位于陕北和山西吕梁山区，为了缓解水土流失、保护生态环境，各地开始实施小范围的禁止砍伐放牧、大规模的退耕还林还草等工程[39]，因此，陕北和山西吕梁山区人类活动对植被NPP表现为积极影响。

本研究将温度、降水作为关键气候因子，基于残差分析剥离气候变化和人类活动，结果显示，2000—2018年黄土高原植被NPP变化由气候变化(48.78%)和人类活动(51.22%)共同驱动，这与前人的研究结果一致[40-41]。此外，残差分析虽广泛应用于分离气候变化和人类活动影响因素的研究，但其自身也存在待完善的部分，比如，本研究仅选择气温、降水代替气候因子建立与植被净初级生产力的回归方程，现有部分研究[18,29]也考虑了太阳辐射等其他气候因子或者更具有生态价值的气候指数等，未来研究如何选择气候因子增加方程的合理性仍具有不确定性；在人为因素方面，只能一概而论为人类活动，并不能细化其具体方式如城市扩张、生态建设等。因此，未来需要通过增加气候要素选择的合理性、细化人类活动的具体方式，达到减少植被NPP影响因素研究的不确定性。

5 结 论

本研究基于CASA模型估算了黄土高原植被NPP数据集，通过趋势分析、相关性和残差分析等方法，定量探究了2000—2018年黄土高原气候变化和人类活动对植被NPP的影响，主要结论如下：

(1) 黄土高原2000—2018年植被NPP为东南高西北低的分布格局，整体上呈波动上升的态势，研究区中部的陕西北部和山西吕梁山呈增加趋势，西北部的干旱沙漠区等自然环境较差的地区植被NPP呈下降趋势。

(2) 2000—2018年黄土高原气候对植被NPP变化的贡献率为48.78%，其中植被NPP与降水为正相关关系、与气温呈负相关关系，气候变化起主导作用的区域主要分布在河套平原一带、山西北部和南部地区；人类活动对植被NPP变化的贡献率为51.22%，贡献率大于60%的区域主要分布在山西中部、陕西北部延安市和中部宝鸡市、庆阳市、平凉市。

(3) 黄土高原作为干旱半干旱区植被对气候变化的响应更为敏感，随着退耕还林还草构成的大规

模实施,人类活动在生态改善方面发挥着重要作用。本文仅将温度、降水作为气候变化的关键因子,忽视了其他可能对植被变化产生影响的因素,并未细化人类活动的具体方法。因此,黄土高原气候变化和人类活动对植被变化的影响机制仍需深入研究,以期为区域生态恢复和管理提供科学依据。

参考文献(References):

[1] 屈莹波, 赵媛媛, 丁国栋, 等. 气候变化和人类活动对锡林郭勒草原植被覆盖度的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 802-811. [Qu Yingbo, Zhao Yuanyuan, Ding Guodong, et al. Effects of climate and human activities on vegetation cover changes in Xilinguol steppe[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 802-811.]

[2] Kong D D, Zhang Q, Singh V P, et al. Seasonal vegetation response to climate change in the northern Hemisphere (1982-2013) [J]. Global and Planetary Change, 2017, 148: 1-8.

[3] 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 等. 2000—2015年青藏高原植被NPP时空变化格局及其对气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2020, 35(10): 2511-2527. [Chen Shuting, Guo Bing, Yang Fei, et al. Spatial and temporal patterns of NPP and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2015[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(10): 2511-2527.]

[4] Jiao W, Chen Y N, Li W H, et al. Estimation of net primary productivity and its driving factors in the Ili River Valley, China[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(5): 781-793.

[5] 刘彩红, 王朋岭, 温婷婷, 余迪, 白文蓉. 1960—2019年黄河源区气候变化时空规律研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 293-302. [Liu Caihong, Wang Pengling, Wen Tingting, et al. Spatiotemporal characteristics of climate change in the Yellow River source area from 1960 to 2019[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 293-302.]

[6] 张镱锂, 祁威, 周才平, 等. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1197-1211. [Zhang Yili, Qi Wei, Zhou Caiping, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production(NPP) of alpine grassland on Tibetan Plateau from 1982 to 2009[J]. Acta Geographical Sinica, 2013, 68(9): 1197-1211.]

[7] Chemodanov A, Jinjikhashvily G, Habiby O, et al. Net primary productivity, biofuel production and CO_2 emissions reduction potential of *Ulva* sp. (Chlorophyta) biomass in a coastal area of the Eastern Mediterranean[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 148: 1497-1507.

[8] Zhang Y, Hu Q W, Zou F L. Spatio-temporal changes of vegetation Net Primary Productivity and its driving factors on the Qinghai-Tibetan Plateau from 2001 to 2017[J]. Remote Sensing, 2021, 13(8): 1566-1587.

[9] 杨会巾, 李小玉, 刘丽娟, 等. 基于耦合模型的干旱区植被净初级生产力估算[J]. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1750-1758. [Yang Huijin, Li Xiaoyu, Liu Lijuan, et al. Estimation of net primary productivity in arid region based on coupling model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(6): 1750-1758.]

[10] 赵苗苗, 刘熠, 杨吉林, 等. 基于HASM的中国植被NPP时空变化特征及其与气候的关系[J]. 生态环境学报, 2019, 28(2): 215-225. [Zhao Miaomiao, Liu Yi, Yang Jilin, et al. Spatio-temporal patterns of NPP and its relations to climate in China based on HASM[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(2): 215-225.]

[11] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. Science, 2003, 300(5625): 1560-1563.

[12] 秦泗国, 钟国辉, 王景升. 那曲草地气候格局对草地NPP的影响及载畜量研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(7): 159-164. [Qin Siguo, Zhong Guohui, Wang Jingsheng. The Influence of climate pattern on grassland NPP and the study on livestock carrying capacity in NagQu[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(7): 159-164.]

[13] 崔珍珍, 马超, 陈登魁. 1982—2015年科尔沁沙地植被时空变化及气候响应[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 536-544. [Cui Zhenzhen, Ma Chao, Chen Dengkui. Spatiotemporal variation of vegetation in the Horqin Sandy Land and its response to climate change from 1982-2015[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 536-544.]

[14] 张杰, 潘晓玲, 高志强, 等. 干旱生态系统净初级生产力估算及变化探测[J]. 地理学报, 2006, 61(1): 15-25. [Zhang Jie, Pan Xiaoling, Gao Zhiqiang, et al. Satellite estimates and change detection of Net Primary Productivity of oasis-desert based on ecosystem process with remotely sensed forcing in arid western China[J]. Acta Geographical Sinica, 2006, 61(1): 15-25.]

[15] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学, 2007, 31(3): 414-424. [Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of Net Primary Productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 414-424.]

[16] 朱莹莹, 韩磊, 赵永华, 等. 中国西北地区NPP模拟及其时空格局[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1861-1871. [Zhu Yingying, Han Lei, Zhao Yonghua, et al. Simulation and spatio-temporal of vegetion NPP in Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(6): 1861-1871.]

[17] 崔林丽, 杜华强, 史军, 等. 中国东南部植被NPP的时空格局变化及其与气候的关系研究[J]. 地理科学, 2016, 36(5): 787-793. [Cui Linli, Du Huaqiang, Shi Jun, et al. Spatial and temporal pattern of vegetation NPP and its relationship with climate in the southeastern China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(5): 787-793.]

[18] Ge W Y, Deng L Q, Wang F, et al. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary pro-

ductivity dynamics in China from 2001 to 2016[J]. Science of Total Environment, 2021, 773: 145648.

[19] 姬盼盼, 高敏华, 杨晓东. 中国西北部干旱区NPP驱动力分析——以新疆伊犁河谷和天山山脉部分区域为例[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 2995-3006. [Ji Panpan, Gao Minhua, Yang Xiaodong. Analysis of NPP driving force in an arid region of Northwest China: A case study in Yili Valley and parts of Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 2995-3006.]

[20] Liu F, Yan H M, Gu F X, et al. Net Primary Productivity increased on the Loess Plateau following implementation of the Grain to Green Program[J]. Journal of Resources and Ecology, 2017, 8(4): 413-421.

[21] Bryan B A, Gao L, Ye Y Q, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency[J]. Nature, 2018, 559(7713): 193-204.

[22] 韩丹丹, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土高原地区植被变化及其对极端气候的响应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 247-254. [Han Dandan, Mu Xingmin, Gao Peng, et al. Dynamic changes of vegetation in Loess Plateau and its response to extreme climate[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 247-254.]

[23] 程晓鑫, 何远梅, 张岩. 黄土高原植被恢复与局地气候变化的关系[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 25-33. [Cheng Xiaoxin, He Yuanmei, Zhang Yan. Correlations between vegetation restoratiom and regional climate change in the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(4): 25-33.]

[24] 宋永永, 薛东前, 马蓓蓓, 等. 黄土高原城镇化过程及其生态环境响应格局[J]. 经济地理, 2020, 40(6): 174-184. [Song Yongyong, Xue Dongqian, Ma Beibei, et al. Urbanization process and its ecological environment response pattern on the Loess Plateau, China [J]. Economic Geogragphy, 2020, 40(6): 174-184.]

[25] 修丽娜, 颜长珍, 钱大文, 等. 生态工程背景下黄土高原植被变化时空特征及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 214-221. [Xiu Lina, Yan Changzhen, Qian Dawen, et al. Analysis of spatial-temporal change and driving forces of vegetation in Loess Plateau under background of ecological engineering[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 214-221.]

[26] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 等. 基于GIS和RS的区域陆地植被NPP估算——以中国内蒙古为例[J]. 遥感学报, 2005, 20(3): 300-307. [Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Long Zhonghua, et al. Estimating Net Primary Productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS: A case study in Inner Mongolia, China[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2005, 20(3): 300-307.]

[27] Yin L C, Feng X M, Fu B J, et al. Irrigation water consumption of irrigated cropland and its dominant factor in China from 1982 to 2015[J]. Advances in Water Resources, 2020, 143: 103661.

[28] Sun Y L, Yang Y L, Zhang L, et al. The relative roles of climate variations and human activities in vegetation change in North China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2015, 87-88: 67-78.

[29] Teng M J, Zeng L X, Hu W J, et al. The impacts of climate changes and human activities on net primary productivity vary across an ecotone zone in Northwest China[J]. Science of Total Environment, 2020, 714: 136691.

[30] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.

[31] Li G, Sun S B, Han J C, et al. Impacts of Chinese grain for green program and climate change on vegetation in the Loess Plateau during 1982-2015[J]. Science of Total Environment, 2019, 660: 177-187.

[32] 张江, 袁旻舒, 张婧, 等. 近30年来青藏高原高寒草地NDVI动态变化对自然及人为因子的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6269-6281. [Zhang Jiang, Yuan Minshu, Zhang Jing, et al. Responses of the NDVI of alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau to climate change and human activities over the last 30 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6269-6281.]

[33] Shi S Y, Yu J J, Wang F, et al. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes over multiple time scales on the Loess Plateau[J]. Science of Total Environment, 2021, 755(2): 142419.

[34] Li Y Z, Fan J W, Hu Z M, et al. Comparison of evapotranspiration components and water-use efficiency among different land use patterns of temperate steppe in the northern China pastoral-farming ecotone[J]. International Journal of Biometeorology, 2016, 60(6): 827-841.

[35] 马柱国, 符淙斌, 周天军, 等. 黄河流域气候与水文变化的现状及思考[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(1): 52-60. [Ma Zhuguo, Fu Congbin, Zhou Tianjun, et al. Status and ponder of climate and hydrology changes in the Yellow River Basin[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 52-60.]

[36] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, et al. Investigation of factors controlling the regional-scale distribution of dried soil layers under forestland on the Loess Plateau, China[J]. Surveys in Geophysics, 2011, 33(2): 311-330.

[37] 代子俊, 赵霞, 李冠稳, 等. 基于GIMMS NDVI 3g. v1的近34年青海省植被生长季NDVI时空变化特征[J]. 草业科学, 2018, 35(4): 713-725. [Dai Zijun, Zhao Xia, Li Guanwen, et al. Spatial-temporal variations in NDVI in vegetation-growing season in Qinghai based on GIMMS NDVI 3g. v1 in past 34 years[J]. Prataculutural Science, 2018, 35(4): 713-725.]

[38] 易浪, 任志远, 张翀, 等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 166-174. [Yi Lang, Ren Zhiyuan, Zhang Chong, et al. Vegetation cover, climate and human activities on the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2014, 36(1): 166-174.]

[39] Gang C C, Zhao W, Zhao T, et al. The impacts of land conversion and management measures on the grassland net primary productivity over the Loess Plateau, northern China[J]. Science of Total En-

vironment, 2018, 645: 827–836.

[40] Zheng K, Wei J Z, Pei J Y, et al. Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau[J]. Science of Total Environment, 2019, 660: 236–244.

[41] Li J J, Peng S Z, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 247: 260–270.

Contribution of climatic change and human activities to changes in net primary productivity in the Loess Plateau

YANG Dan[1], WANG Xiaofeng[2,3]

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Land Reclamation Engineering, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In this study, we used the CASA model to produce a net primary productivity (NPP) dataset for the Loess Plateau from 2000 to 2018. Based on correlation and residual analyses, we quantified the relative contribution of climate change and human activities to NPP, with a goal of providing a scientific basis for the formulation of local ecological protection strategies and improving watershed ecological security. The distribution pattern of NPP in the Loess Plateau from 2000 to 2018 was high in the southeast and low in the northwest. The portion of NPP that followed an increasing trend was mainly distributed in the core area of the Grain for Green Program, accounting for 86.86% of the total NPP, whereas the portion of the NPP that followed a decreasing trend was distributed in the northwestern arid zone, accounting for 13.14% of the total NPP. The contribution rates of climate change and human activities to NPP were 48.78% and 51.22%, respectively. Climate change plays an important role in vegetation change in sparsely populated and underdeveloped areas, whereas human activities play an important role in vegetation change in areas with large populations and better economic development. The Loess Plateau, an arid and semi-arid region, has a more sensitive vegetation response to climate change. With the increasing frequency of human activities, climate and human activities jointly determine the vegetation changes. This study contributes to the understanding of the effects of climate change and human activities on the dynamic changes of vegetation. It provides a scientific basis for vegetation restoration and high-quality development of the Loess Plateau.

Keywords: climatic change; human activities; residuals analysis; Loess Plateau